干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2019.02.09

新疆和田地区耕地面源污染生态风险评价①

田丰收， 刘新平， 原伟鹏
（新疆农业大学管理学院，新疆 乌鲁木齐 830052）

摘 要：随着化肥、农膜等在农业生产中的过量投入，耕地面源污染的程度随之加重。选取塔里木河流域上游和田地区为研究区域，依据 P-S-R 框架理论，构建和田地区耕地面源污染生态风险评价指标体系，加入土壤理化数据，使用生态风险评价模型对和田地区 1980 年及 2016 年耕地面源污染状况进行生态风险评价，运用耕地生态风险模型、生态风险转移矩阵、ArcGIS 分析和田地区耕地面源污染时空分异状况。研究结论表明：和田地区 1980 年耕地生态风险等级均为Ⅱ级或Ⅲ级，呈“中间高，两侧低”分布；2016 年耕地生态风险等级上升至Ⅳ级或Ⅴ级，呈“倒 W 型”分布，各县耕地面源污染程度较 1980 年均有较大幅度的上升，其中墨玉县和于田县在 2016 年耕地生态风险等级达到最高的Ⅴ级，而民丰县因自身生态环境的强脆弱性，同样需要提高关注。根据面源污染“从源头治理”的原则，应切实推进和田地区耕地生态环境保护与治理，提高政府重视程度，增强技术指导，开展试点工作，改善和田地区耕地面源污染现状。

关 键 词： 生态风险评价；时空分异；P-S-R 框架；耕地面源污染；和田地区
文章编号： 1000-6060(2019)02-0295-11(0295～0305)

2018 年中央一号文件指出加强农业面源污染防治，开展农业绿色发展行动，推进有机肥替代化肥、废弃农膜回收的发展。面源污染是相对于点源污染而言的，在国家对点源污染如工业废水排放治理关注度提高的背景下，面源污染逐渐成为耕地污染的关键因素。随着社会经济及城市化的发展，农民对耕地单产的追求欲日益提高，从而导致化肥、农药、农膜施用量不断上升，耕地面源污染程度也随之加重，引起了国内广大学者的重视[1]。在研究方法上除构建基于综合评价法的风险评价模型外[2]，部分学者运用聚类统计，分析中国农业面源污染时空分异情况[3]；也有学者将环境库兹涅茨曲线、物元分析等方法引入到面源污染评价体系中，评价区域内耕地生态风险水平[4-5]。目前我国学者对于面源污染的研究区域主要集中在太湖、长江流域、黄河流域等经济发展较快、气候相对湿润的地区，对于西北干旱区缺乏相应的研究[6-12]。塔里木河流域地处大陆内部，干旱的气候以及贫瘠的水资源致使该区域的可开垦耕地资源有限。近 30 a 来，随着中国经济社会及城市化进程的提速发展，东部地区有限耕地资源与建设用地的矛盾进一步加深，耕地资源的开发重点逐渐由东部转向西部地区。资本的涌入使得塔里木河流域不合理开垦耕地面积逐渐增大，近 60 a 来流域内增加了近 100×10^4 hm^2 的耕地[13]。

塔里木河流域地处新疆南部贫困县市集中区域，大多数农户耕作意识仍停留在“产量高，收益高”的层面，缺乏相应的科学耕种知识，因而造成化肥、农膜等的超量施用，化肥中富余的氮磷钾养分通过地表径流、地下渗透及农田排水的形式进入耕地系统，再加上几十年来土壤中积累残膜阻碍土壤毛管水和自然水的渗透，引起土壤板结、通透性下降等土壤污染问题，严重破坏耕地生态系统，加重区域耕地面源污染程度。被污染耕地需经过长期且复杂的整治方能恢复，需提早加以重视，从耕地污染发生的早期进行管治。和田地区位于塔里木河上游，富余的氮磷等污染物通过地

① 收稿日期：2018-06-21； 修订日期：2018-11-16
基金项目：新疆农业大学研究生科研创新项目(XJAUGRI2016021)；国家自然科学基金项目(71663051)
作者简介：田丰收(1995-)，男，汉族，河南禹州人，硕士研究生，研究方向为土地资源利用与管理. E-mail:752763686@qq.com
通讯作者：刘新平(1959-)，男，教授，博士，研究方向为土地利用与管理. E-mail: lxping16@163.com

表径流进入中下游地区,污染水资源环境,加重流域内耕地面源污染程度,结合国家"从源头治理"的面源污染治理原则,开展和田地区耕地面源污染生态风险评价研究,对了解塔里木河流域耕地面源污染状况,施行面源污染管控措施具有一定的现实指导意义。

1 研究区概况

和田地区位于新疆南部塔里木盆地西南部,属于大陆性暖温带极端干旱荒漠气候,中心位置位于79.92 °E, 37.12 °N,北部与阿克苏地区相接,南部为西藏自治区,东部为同属新疆维吾尔自治区的巴音郭楞蒙古自治州,西部与喀什地区相接。和田地区地势总体上南高北低,南部为昆仑山系,中部是山前坡麓地带,北部为塔克拉玛干沙漠区(图1)。和田地区位于塔里木河流域上游地区,区内已开垦耕地主要位于中部地带,分布于和田河流域及克里雅河流域,全部为依赖灌溉的水浇地,农业用水占全区总用水量的96.18%。地区年均气温14.7 ℃,年均降水量53 mm,全年日照时数2 564.4 h。地区内共有喀拉喀什河、玉龙喀什河、和田河、克里雅河四支河流,河流的主要补给源为南部昆仑山脉冰川积雪消融。其中喀拉喀什河与玉龙喀什河在沙漠腹地汇聚为和田河,和田河由南向北穿过塔克拉玛干大沙漠汇入塔里木河,是塔里木河的三大源流之一。

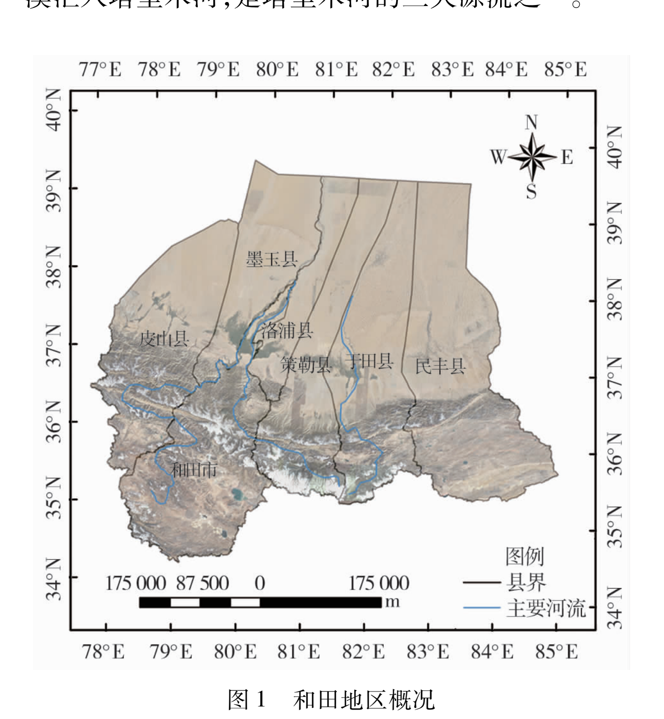


图1 和田地区概况

Fig. 1 Intorduction to Hotan Prefecture

2 数据来源及评价指标构建

2.1 数据来源

本文影像图资料来源于中国科学院遥感与数字地球研究所数据中心。和田地区县市边界及地形图来源于和田地区国土资源局。社会经济数据来源于《和田地区统计年鉴2017》、《新疆统计年鉴2017》、《和田地区辉煌五十年(1954—2003)》、《新疆五十年年鉴(1955—2005)》。1980年土壤理化数据来源于新疆第二次土壤普查,2016年土壤理化数据来源于专题调研数据。由于和田市于1984年从和田县划出,缺少1980年社会经济数据,因此将和田县并入和田市进行分析。

2.2 评价指标构建

P-S-R(压力—状态—响应)框架模型由联合国经济合作开发署提出,一直以来都是研究地域生态风险评价的重要模型。本文中耕地面源污染生态风险评价体系构建的基本思路是人类活动对耕地生态系统施加"压力",改变了耕地生态系统的"状态"和耕地面源污染的强度;"响应"指标则代表随着"状态"变化,地区内经济社会发展的响应程度。P-S-R模型作为一项系统性强的框架模型,从人与自然相互作用的逻辑出发,适合用于和田地区耕地面源污染生态风险评价。

目前对农业面源污染的研究主要通过计算人为TN、TP排放来判定地区面源污染程度[14-15],从经济学"投入—产出"角度看,仅计算了人为投入量,缺少人为活动造成耕地面源污染结果的计算,存在一定的片面性。本研究依据P-S-R框架模型,将人为压力指标作为压力层,代表人类活动对耕地造成的危害;将土壤理化指标作为状态层,代表人类活动造成耕地面源污染现状;将农业社会经济指标作为响应层,代表人类活动造成面源污染后区域内社会发展响应情况。本研究在参考其他相关研究的基础上[16-21],结合和田地区实际情况,按照指标选取的科学性、逻辑性、合理性、动态性等原则,依据耕地面源污染相关指标的逻辑关系,以和田地区耕地面源污染生态风险评价为目的,基于P-S-R模型的指标体系分为目标层、准则层、要素层和指标层四个层次。重点选取与和田地区耕地面源污染密切相关的16项指标,探讨构建和田地区耕地面源污染生态风险评价指标体系(表1)。

3　和田地区耕地面源污染生态风险指数计算

3.1　数据标准化处理

由于不同指标间的单位大小各异，在进行生态风险计算时，首先将数据进行标准化处理，以便分析对比。指标分为正向指标及负向指标，正向指标代表该指标值越大，则土地生态风险越大，反之则风险减小。采用极差法计算数据标准值，正向指标标准化公式为：

$$b_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \tag{1}$$

相对的，负向指标标准化公式为：

$$b_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \tag{2}$$

式中：$\max x_{ij}$为同指标纵向最大值，$\min x_{ij}$为同指标纵向最小值，x_{ij}为第 j 项指标下第 i 个被评价对象的原始值，b_{ij}为指标原始值标准化后标准值。

3.2　确定指标权重

为客观的确定指标的权重，采用客观赋权法中的熵权法来确定指标权重。在数据标准化后的基础上：

①计算第 j 项指标下第 i 个被评价对象的特征比重：

$$Y_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} b_{ij}} \tag{3}$$

②计算指标信息熵：

$$e_j = -k\sum_{i=1}^{m}(Y_{ij} \times \ln Y_{ij}) \tag{4}$$

③计算信息熵冗余度：

$$d_j = 1 - e_j \tag{5}$$

④计算指标权重：

$$w_j = d_j / \sum_{j=1}^{n} d_j \tag{6}$$

根据以上计算步骤可得各指标的权重；和田地区 P-S-R 耕地面源污染生态风险评价指标体系及权重见表 1。

3.3　耕地生态风险值计算

根据各指标实际值，结合各项指标国际标准值、新疆平均值或部分国家行业标准的参照基准值，计算各指标生态风险值，计算公式为：

表 1　指标体系及权重

Tab. 1　Indicator system and weight

目标层	准则层	要素层	权重	指标层	权重	指标代码	标准值	标准值来源	指标趋向
和田地区耕地面源污染生态风险	压力（权重：0.41）			人口密度 / 人·hm^{-2}	0.06	C_1	1.29	国际公认值	正向
		社会压力	0.14	人口自然增长率 / ‰	0.08	C_2	11.60	十三五规划	正向
		土地压力	0.05	耕地比重 / %	0.05	C_3	2.48	新疆平均值	正向
				单位耕地化肥施用量 / kg·hm^{-2}	0.12	C_4	255.00	国际公认值	正向
		环境压力	0.22	单位耕地机械化水平 / kW·hm^{-2}	0.04	C_5	–	极差标准化	负向
				草原载畜量 / 头·hm^{-2}	0.06	C_6	0.29	新疆平均值	正向
	状态（权重：0.31）			土壤含盐量 / g·kg^{-1}	0.06	C_7	4.00	国家标准值	正向
				土壤 pH	0.08	C_8	8.53	新疆平均值	正向
		自然状态	0.31	有机质 / g·kg^{-1}	0.04	C_9	11.10	新疆平均值	正向
				全氮 / g·kg^{-1}	0.06	C_{10}	20.00	全国平均值	正向
				全磷 / mg·kg^{-1}	0.07	C_{11}	85.00	全国平均值	正向
	响应（权重：0.28）	人文响应	0.13	人均粮食产量 / t	0.05	C_{12}	0.45	《2017－2023 年中国粮食行业市场需求与投资规划分析报告》	负向
				人均耕地面积 / hm^2	0.05	C_{13}	0.05	国际公认值	负向
				第一产业就业比重 / %	0.03	C_{14}	43.50	新疆平均值	正向
		经济响应	0.15	经济密度 / 10^4元·hm^{-2}	0.08	C_{15}	–	极差标准化	负向
				人均 GDP / 10^4 元	0.07	C_{16}	–	极差标准化	负向

正向指标生态风险值计算公式：

$$P_{ij}=\begin{cases}1 & x_{ij}\geqslant S_j\\ \frac{x_{ij}}{S_j}\times 100\% & x_{ij}<S_j\end{cases} \tag{7}$$

负向指标生态风险值计算公式：

$$P_{ij}=\begin{cases}1 & x_{ij}\leqslant S_j\\ \frac{S_j}{x_{ij}}\times 100\% & x_{ij}>S_j\end{cases} \tag{8}$$

式中：P_{ij} 为各项指标的生态风险值，x_{ij} 为指标实际值，S_j 为各项指标的标准值。

3.4 耕地生态风险模型

耕地生态风险指数（Cultivated land Ecological Risk，*CER*）是衡量一个地区耕地生态风险程度的模型，它能根据评价指标数据，测算出地区的耕地生态风险状况，*CER* 模型为：

$$CER=\sum_{i=1}^{m}p_{ij}\times w_j \tag{9}$$

单项指标的耕地生态风险指数为：

$$CER_i=p_{ij}\times w_j \tag{10}$$

式中：*CER* 表示单位研究区域的耕地面源污染生态风险指数，p_{ij}为计算后的生态风险值，w_j 为第 j 项指标的熵权。

3.5 评价标准

在过去的生态风险研究中，常将生态风险程度由低到高划分为安全、较安全、临界危陷、较危险、危陷五个等级，一般每隔 0.2 分值为一级。但该分级标准过于固化，不利于体现县市差别，在研究了和田地区的特殊性及参阅了大量相关文献后[22-23]，结合实际调研见闻，对分级标准适当调整，得出和田地区耕地面源污染生态风险评价等级标准（表 2）。

3.6 灰色关联度分析

灰色关联度分析是根据变量间发展趋势的相似性来探寻变量间的数量关系，确定指标与评价结果的关联程度。其计算公式如下：

（1）关联系数计算：

$$\xi_{0i}=\frac{\Delta(\min)+\rho\Delta(\max)}{\Delta_{0i}(K)+\rho\Delta(\max)} \tag{11}$$

式中：ξ_{0i} 为关联系数；$\Delta(\min)$ 和 $\Delta(\max)$ 分别代表参考序列与比较序列绝对值的最小值和最大值；$\Delta(K)$ 是比较序列曲线上数据点与参考序列曲线上数据点差值的绝对值；ρ 为分辨系数，本文取 0.5。

表 2 和田地区耕地面源污染生态风险评价等级标准

Tab. 2 Ecological risk assessment standard for the surface ground source pollution in Hotan Prefecture

风险等级	分值	耕地生态系统特征	ArcGIS 图层颜色
Ⅰ	[0,0.30)	区域耕地生态系统安全，耕地面源污染程度低，耕地可持续性强，利于区域农业发展	绿
Ⅱ	[0.30,0.50)	区域耕地生态系统较为安全，耕地面源污染程度较低，耕地可持续性较强，适合区域农业发展	黄
Ⅲ	[0.50,0.65)	区域耕地生态系统处于临界危陷状态，耕地面源污染程度加重，耕地可持续性下降，能够满足区域农业发展的一般要求	紫
Ⅳ	[0.65,0.75)	区域耕地生态系统较为危陷，耕地面源污染程度较重，开始出现土壤板结等土壤问题，勉强满足区域农业的发展	橙
Ⅴ	[0.75,1]	区域耕地生态系统处于危陷状态，耕地面源污染严重，存在土壤板结等问题，难以维持区域农业的可持续发展	红

（2）关联度计算：

$$\gamma_i=\frac{1}{N}\sum_{t=0}^{n}\xi_i(K) \tag{12}$$

式中：γ_i 为指标灰色关联度，用于表征两组数据间的关联性。该值越接近 1，说明指标关联度越好。

4 结果与分析

4.1 和田地区耕地面源污染生态风险综合分析

基于 P-S-R 评价指标体系，运用耕地生态风险模型分别计算出 1980 年和 2016 年和田地区七县市准则层及目标层的生态风险指数（表 3）。为更好的描述 CER 时空分异特征，将所得结果导入 ArcGIS 中，根据表 2 中的等级标准分别绘制 1980 年和 2016 年和田地区耕地面源污染生态风险等级空间分布图（图 2、图 3），实现耕地面源污染生态风险评价结果可视化。

由表 3 知，和田地区各县耕地面源污染生态风险综合指数上升幅度较大。从地区整体角度，和田地区 2016 年耕地面源污染生态风险指数较 1980 年上升 1.312 8。其中压力风险指标上升 0.833 5，上涨幅度大；状态风险指标上升 0.412 2，上升幅度相对较小；响应风险指标上升最小，较1980年上升了

表 3　和田地区耕地面源污染生态风险评价结果

Tab. 3　Ecological risk assessment results of surface land source pollution in Hotan Prefecture

县市名称	压力		状态		响应		耕地生态风险	
	1980 年	2016 年	1980 年	2016 年	1980 年	2016 年	1980 年	2016 年
和田市	0.160 3	0.298 0	0.135 0	0.171 1	0.224 7	0.202 9	0.519 9	0.672 0
墨玉县	0.193 6	0.291 5	0.162 7	0.235 4	0.163 8	0.224 8	0.520 1	0.751 7
皮山县	0.126 4	0.276 5	0.159 5	0.234 0	0.198 6	0.206 1	0.484 5	0.716 6
洛浦县	0.190 6	0.308 9	0.162 0	0.193 0	0.173 0	0.193 1	0.525 6	0.695 0
策勒县	0.139 2	0.272 0	0.188 3	0.193 3	0.194 5	0.205 1	0.522 0	0.670 5
于田县	0.154 1	0.276 7	0.178 6	0.247 1	0.181 4	0.220 8	0.514 0	0.744 6
民丰县	0.116 8	0.220 4	0.151 5	0.275 8	0.190 7	0.180 0	0.458 9	0.676 3
总计	1.223 6	2.057 1	1.137 6	1.549 7	1.573 0	1.640 1	3.934 1	5.246 9

0.067 1。随着时间推进,和田地区人类活动对耕地生态系统的压力增幅明显,从而引起耕地面源污染加重,土壤状态风险指数提升,但农业的高投入不能带动当地经济的有效发展,因此响应风险指数仍呈小幅上涨趋势。

从县市角度,和田地区 2016 年 7 个县市耕地面源污染生态风险指数较 1980 年平均增加 0.197 4。其中墨玉县与皮山县增幅最大,两县耕地生态风险指数分别增加 0.231 6 和 0.232 1,三项指数均有一定程度上升;上涨最小的县市为策勒县,该县位于克里雅河与和田河之间,水资源比较充足,耕地生态系统相对稳定,因而状态指数变化量最小,但其综合指数增长了 0.148 5,仍属于需关注区域。民丰县和于田县两县指数分别增加 0.193 0 和 0.195 8,增速略低于墨玉县和皮山县,但高于其他三县,其中于田县耕地总量大,对农业的依赖性强,且地理位置相对偏僻,对外交通不便,因而缺乏先进的耕作模式;民丰县综合指数上升的主要原因是该县境内气候干旱,水资源极少,生态环境脆弱,耕地生态系统易受人类活动的影响,随着人类活动压力的提升,该区域的土壤状态风险指数迅速提高;其余县市中洛浦县及和田市受地理位置优越及外来资本进入的影响,两县对农业的依赖度有所下降,且农户对先进农业生产方式的理解度较高,因而综合指数上升相对较小,说明先进农业生产理念能在一定程度上遏制耕地面源污染问题的加重;但和田市人口增速高,加大了农户对耕地高单产的追求欲望,和田市指数较 1980 年增

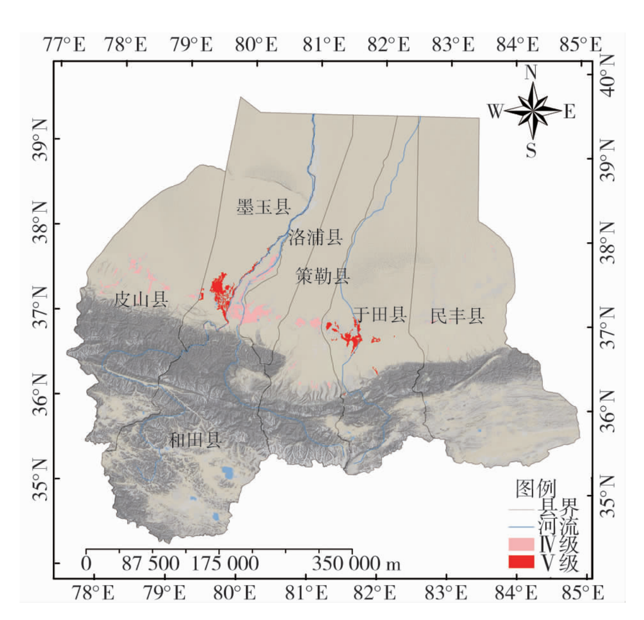


图 3　2016 年和田地区耕地面源污染生态风险等级分布

Fig. 3　Distribution of ecological risk levels of surface ground source pollution in Hotan Prefecture in 2016

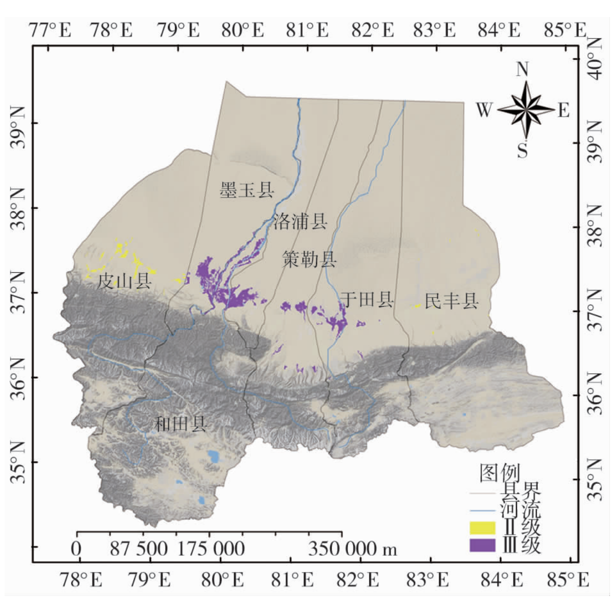


图 2　1980 年和田地区耕地面源污染生态风险等级分布

Fig. 2　Distribution of ecological risk levels of surface ground source pollution in Hotan Prefecture in 1980

长 0.152 0;较洛浦县涨幅 0.169 4 略低。

由图 2、图 3 知,和田地区耕地面源污染程度在 1980—2016 年期间整体呈上升趋势,上升幅度大。1980 年和田地区各县耕地生态风险等级均为 II 级或 III 级,呈"中间高,两侧低"分布,耕地面源污染程度相对较轻,土壤养分充足,耕地生态环境较为完整,基本能满足耕地可持续发展的要求。其中民丰县、皮山县因地理位置偏僻、境内无大型河流穿过、耕地开发及人类活动较少的缘故,两县耕地生态风险等级均为 II 级,属于风险较低的县市;而其他区域靠近河流,水源相对充沛,环境更适宜居住,因此人类活动较多,加重了耕地面源污染程度,但足以维持区域耕地生态平衡。

2016 年和田地区各区域耕地面源污染生态风险等级呈"倒 W 型"分布,墨玉县与于田县最高,其他县市相对较低。7 个县市生态风险等级均为 IV 级或 V 级,耕地面源污染程度高,出现土壤板结、通透性下降等土壤污染问题,耕地生态系统受到破坏,急需加以重视。7 个县市中墨玉县和于田县耕地生态风险等级均从 III 级上升到最高的 V 级,经实地调研分析知,两县分别紧靠克里雅河与和田河,人口增加过多、人均耕地趋减、耕地承载力加重,同时工业的发展相对较慢,对农业的依赖性强,且农作人口中外来人口较少,缺少科学化、大机械化的农业生产模式,农民在缺少生态保护意识的情况下容易受"化肥高 = 产量高"思维的影响,通过超量施用化肥的方式来提高产量。民丰县与皮山县位置较为偏僻,耕地总量少,因而耕地生态风险程度相对较低,但其耕地生态风险等级仍上升两级,恶化速度快;民丰县虽然耕地量极少,但因其耕地生态系统的强脆弱性,需要着重注意人类活动对耕地生态环境的影响。和田市、洛浦县随着近几年来外来人口的大量进入,带来了新的农业理念,因此耕地生态风险等级上升较缓慢;和田市地处和田地区中心,受外来农业思想的影响更深,大量外来农民带来了新的化肥、农膜使用理念,在一定程度上减缓了和田市耕地面源污染的恶化速度。36 a 间和田地区的 7 个县市中 4 个县市耕地生态风险等级提升两级,3 个县市提升一级。

4.2 耕地面源污染生态风险等级转移分析

运用 ArcGIS 软件的空间分析能力,将和田地区 1980 年及 2016 年两期耕地生态风险等级叠加分析,得出耕地生态风险等级转移矩阵(表 4)。

由表 4 可知,和田地区耕地面源污染生态风险等级整体呈"由低到高"的上升趋势。36 a 间,较低等级 II 级发生正向转移,由 II 级向 III 级转移耕地 3.2×10^4 hm^2,占总转移耕地面积的 18.28 %;中等级 III 级发生正向转移,向较高等级 IV 级转移耕地 7.9×10^4 hm^2,占总转移耕地面积的 46.11 %;中等级 III 级向高等级 IV 级转移耕地 6.1×10^4 hm^2,占总转移耕地面积的 35.61 %;全区没有出现低等级 I 级。

4.3 指标关联度分析

通过灰色关联度法计算综合风险评价指数与各指标因子之间的数量关系,可以确定各指标因子相对于研究区耕地面源污染生态风险水平的影响程度。通过计算可得和田地区耕地面源污染生态风险水平与 16 个评价指标的关联度(表 5)。从各指标来看,单位耕地化肥施用量、人均耕地面积、土壤 pH 三项指标与耕地面源污染生态风险评价综合指数关联度最高,其中单位耕地化肥施用量最高,表征该项指标对综合评价指数的影响最大;而全氮、人口自然增长率、全磷、第一产业就业比重、有机质等指标与耕地面源污染生态风险评价综合指数关联度较高,处于第二关联等级,表征该类指标对综合评价指数的影响相对较弱;耕地比重、人口密度、单位耕地机

表 4 耕地面源污染生态风险等级面积转移矩阵

Tab.4 Surface ground source pollution ecological risk grade area transfer matrix

年份	耕地生态风险等级	1980 年					
		I	II	III	IV	V	合计
2016 年	I	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	II	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	III	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	IV	0.00	31 562.34	79 594.08	0.00	0.00	111 156.42
	V	0.00	0.00	61459.18	0.00	0.00	61 459.18
	合计	0.00	31 562.34	141 053.30	0.00	0.00	

表 5　耕地面源污染生态风险评价因子的灰色关联度

Tab. 5　Grey correlation degree of ecological risk assessment factors for cultivated ground source pollution

指标代码	关联度	排序	指标代码	关联度	排序
C_1	0.631 3	13	C_9	0.801 6	8
C_2	0.889 4	5	C_{10}	0.884 4	4
C_3	0.652 9	12	C_{11}	0.850 3	6
C_4	0.942 7	1	C_{12}	0.920 4	2
C_5	0.664 6	14	C_{13}	0.794 2	9
C_6	0.768 3	10	C_{14}	0.853 2	7
C_7	0.589 5	16	C_{15}	0.618 6	15
C_8	0.914 2	3	C_{16}	0.703 4	11

械化水平等指标与耕地面源污染生态风险评价综合指数关联度较低,指标数值变动对综合评价指数的影响有限。

4.4　和田地区耕地面源污染生态风险子系统分析

4.4.1　耕地生态风险压力系统分析　压力系统主要指人类活动对耕地生态系统施加的压力。从表征耕地人为压力水平的各指标计算结果来看,2016 年和田地区各县市压力指数较 1980 年均有大幅度提升,涨幅平均在 0.12 左右(图 4)。各县单位面积化肥施用量指标均有较大幅度的上升,指标实际值由 1980 年的 62.75 kg · hm^{-2}上涨至 2016 年的 452.68 kg · hm^{-2},远远超过国际公认标准,是造成压力指数上升的主要原因。皮山县因靠近第十四师皮山农场,耕地机械化水平较其他县市提升幅度更高;墨玉县受人口基数大、人口增速快的影响,畜牧量提高,同时受政策补贴影响,农机保有量上升,耕地机械化水平提高;和田市、于田县、策勒县、洛浦县各指标均有一定幅度的上升,但提升比例相对不显著,说明耕地系统承受人为压力逐渐上升;民丰县单位耕地化肥施用量提升是造成该县压力指数上升的最关键因素。

4.4.2　耕地生态风险状态系统分析　状态子系统指标主要由土壤理化指标组成,反映人类活动造成耕地污染的程度。从表征耕地土壤状态水平的各指标计算结果来看,2016 年和田地区各县市耕地生态风险状态指数较 1980 年整体呈上升趋势,涨幅相对压力指数较小(图 5)。和田市、洛浦县、策勒县因区域内水资源相对充足,随着逐年耕种对盐碱土地的改良作用,土壤含含盐量下降幅度大,但因化肥施用量提高导致耕地中氮磷元素沉积量增加,因而状态指数较 1980 年有小幅度上升;墨玉县、皮山县、于田县耕地中氮磷元素含量增长幅度较大,且耕地含盐量降幅相对较小,因而状态指数有较大涨幅;民丰县耕地土壤氮磷含量迅速提升,且其他指标评价值变化小,因而状态指数涨幅最高。

4.4.3　耕地生态风险响应系统分析　响应指标反映地区社会经济发展对耕地面源污染的响应程度。从表征耕地社会经济响应水平的各指标计算结果来看,和田市与民丰县响应指数有小幅度下降,洛浦县、皮山县、策勒县响应指数有轻微上升,墨玉县及于田县上升较为明显(图 6)。和田市因地处行政中心,经济发展迅速,经济密度指标风险大幅下降,但外来人口涌入造成人均耕地面积减少,人均耕地面积指标风险值有大幅提升;墨玉县及于田县受高人口自然增加影响,人均耕地面积有明显下降,因而响应指数有明显上升;皮山县、洛浦县、策勒县受人均耕地面积指标与一产就业比重指标一增一减影响,整体变化幅度小;民丰县人均耕地面积同样有小幅

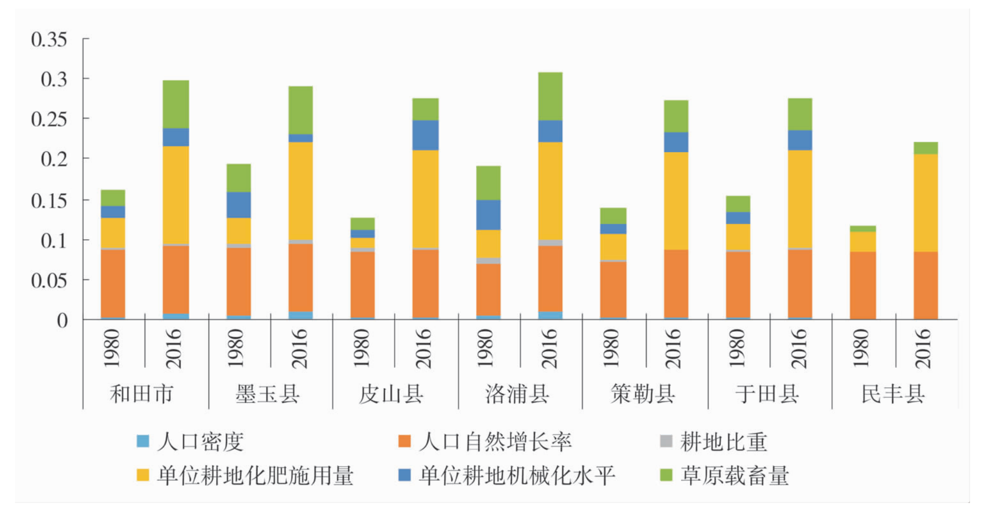


图 4　和田地区耕地面源污染生态风险压力子系统

Fig. 4　Ecological risk pressure subsystem for surface ground source pollution in Hotan Prefecture

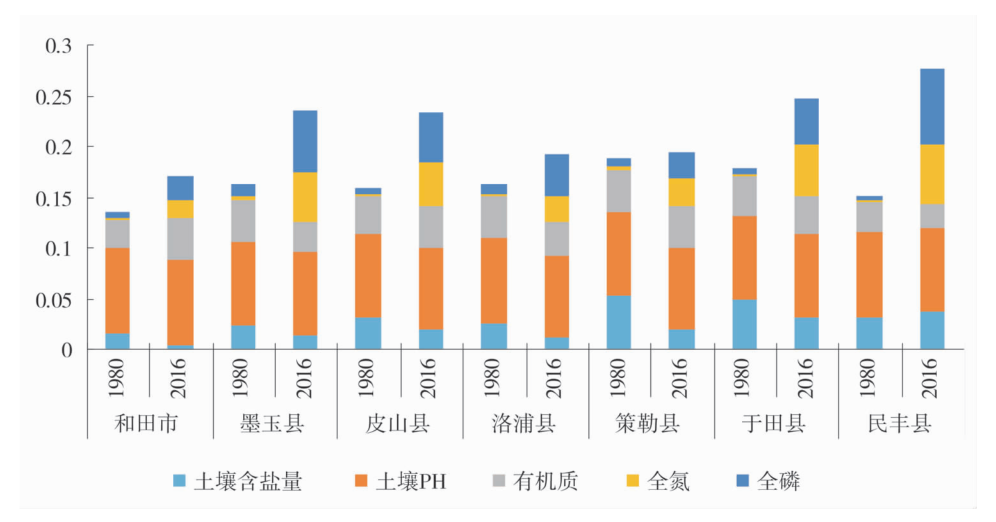


图 5　和田地区耕地面源污染生态风险状态子系统

Fig. 5　Ecological risk status subsystem for surface ground source pollution in Hotan Prefecture

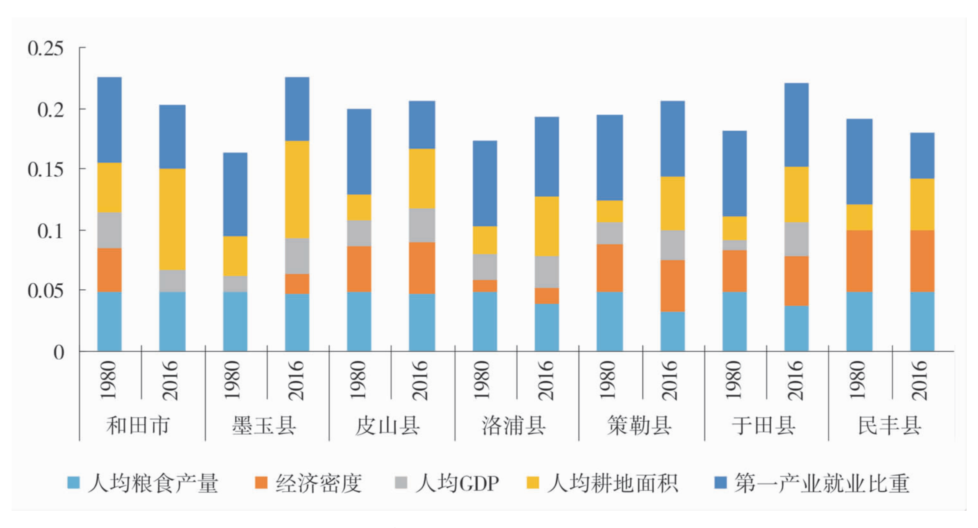


图 6　和田地区耕地面源污染生态风险响应子系统

Fig. 6　Ecological risk response subsystem for surface ground source pollution in Hotan Prefecture

度下降,但第一产业就业比重有大幅度提升,因而该县响应指数有小幅度下降。

5　结 论

本研究基于 P-S-R 框架模型,结合和田地区实际情况,选取耕地面源污染关联指标,将土壤理化指标加入评价指标体系,探讨构建和田地区耕地面源污染生态风险评价指标体系,以期为调控和田地区耕地面源污染提供理论依据。通过生态风险评价及实际调研见闻可得结论:

(1) 时间维度　2016 年和田地区耕地面源污染情况较 1980 年累计效应显著,有不断发展明显恶化趋势,各县耕地生态风险等级较 1980 年均有一个或两个等级的提升。随着人类活动对耕地生态环境的压力逐年增大,尤其是化肥施用量的提升,导致耕地土壤中氮磷元素逐年堆积,耕地生态风险水平逐步上升,加重和田地区耕地面源污染程度。

(2) 空间维度　1980 年和田地区耕地面源污染生态风险等级均为Ⅱ级或Ⅲ级,呈“中间高,两侧低”分布,面源污染程度较浅,其中民丰县与皮山县耕地生态风险等级为Ⅱ级,其他县市耕地生态风险等级为Ⅲ级。2016 年和田地区耕地面源污染生态风险等级为 IV 级或 V 级,较 1980 年有大幅度上升,呈“倒 W 型”分布,其中墨玉县和于田县在 2016 年耕地生态风险等级达到最高的 V 级,其他县市耕地生态风险等级上升为 IV 级。

6　讨 论

(1) 提高耕地面源污染重视程度　和田地区地处塔克拉玛干沙漠腹地,南侧为昆仑山脉,降雨量极

少,耕地生态环境本身具有较强的脆弱性,易受人类活动影响。根据实地调研见闻,当地政府对耕地面源污染关注度较低,仍保留在"工业污染危害大,农业污染可自然净化"的认识层面,耕地面源污染没有得到应该的关注度。因此政府应当提高重视程度,制定生态保护红线及系统化的环境保护法规,将耕地面源污染治理作为一项长期性的战略任务,整合各部门资源,采取部门联合监管的方式,提高耕地面源污染调控力度。

(2)增强技术指导,提高农户教育水平 目前和田地区农户人口普遍受教育程度低,缺少科学化的农作意识,在人口逐渐增多及地区经济水平落后的情况下,农民为保障自身生活,对耕地单产提高的追逐欲逐渐上升,从而造成农业资料过量投入耕地,加重耕地面源污染。根据和田地区的现状及特征,应逐步引入非政府技术推广服务,充分发挥农民合作社、农资供应公司等第三方组织的作用[24],结合政府更迅速有效的推广可持续耕作理念,从而使农户参与到耕地面源污染治理过程中,发动群众力量,以便改善耕地面源污染现状。

(3)以点带面,逐步展开面源污染治理 结合研究结论,民丰县的生态风险等级虽然是相对较低的Ⅳ级,但鉴于该县耕地生态系统具有很强的脆弱性,需要优先在该县开展耕地面源污染治理工作;墨玉县和于田县耕地面源污染生态风险等级在2016年达到最高的(Ⅴ)级,急需给予重视。可将墨玉县、于田县及民丰县三个亟需管控的区域作为管治试点,通过开展科学施肥教育、帮助农民测土施肥工作、提高农膜回收奖励等方式开展耕地面源污染管治工作。通过试点的实践经验反馈,根据管治过程中出现的问题及不足,逐步形成合理有效的和田地区面源污染管治体系,从各县市的不同特征出发,制定差异化的调控措施,以此为基础铺开其他县市耕地面源污染治理工作。

参考文献(References)

[1] 周晓琴,杨乐,杨令飞. 新疆农业面源污染物排放量估算及分析[J]. 农业环境科学学报,2017,36(7):1300-1307.〔ZHOU Xiaoqin,YANG Le,YANG Lingfei. Estimation and analysis of emissions from agricultural non-point source pollution in Xinjiang[J]. Journal of Agro-Environment Science,2017,36(7):1300-1307.〕

[2] 邱孟龙. 珠江三角洲耕地环境质量演变的时空模拟和风险评价[D]. 北京:中国农业大学,2016.〔QIU Menglong. Spatiotemporal simulation and risk assessment of farmland environmental quality in the Pearl River Delta[D]. Beijing:China Agricultural University,2016.〕

[3] 虞慧怡,扈豪,曾贤刚. 我国农业面源污染的时空分异研究[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(9):1-6.〔YU Huiyi,HU Hao,ZENG Xiangang. Spatial-temporal variation of agricultural non-point source pollution in China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2015,29(9):1-6.〕

[4] 张锋. 中国化肥投入的面源污染问题研究—基于农户施用行为的视角[D]. 南京:南京农业大学,2011.〔ZHANG Feng. Study on the non-point pollution of the agricultural fertilizer input in China:Based in the aspect of farmer's fertilizer input[D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University,2011.〕

[5] 张锐. 耕地生态风险评价与调控研究——以江苏省宜兴市为例[D]. 南京:南京农业大学,2015.〔ZHANG Rui. Study in the evaluation and regulation of cultivated land ecological risk:Taking Yixing City Jiangsu Province as an example[D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University,2015.〕

[6] 张爱平,杨世琦,易军,等. 宁夏引黄灌区水体污染现状及污染源解析[J]. 中国生态农业学报,2010,18(6):1295-1301.〔ZHANG Aiping,YANG Shiqi,YI Jun,et al. Analysis on current situation of water pollution and pollutant sources in Ningxia Yellow River irrigation region [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2010,18(6):1295-1301.〕

[7] 马广文,王业耀,香宝,等. 长江上游流域土地利用对面源污染影响及其差异[J]. 农业环境科学学报,2012,31(4):791-797.〔MA Guangwen,WANG Yeyao,XIANG Bao,et al. Diversity and effect of diffuse source pollution load caused by land use change in the upper reach of Yangtze River Basin,China[J]. Journal of Agro-Environment Science,2012,31(4):791-797.〕

[8] ZHU Q D,SUN J H,HUA G F,et al. Run off characteristics and non-point source pollution analysis in the Taihu Lake Basin:A case study of the town of Xueyan,China[J]. Environmental Science and Pollution Research,2015,22(19):15029-15036.

[9] 刘亚琼,杨玉林,李法虎. 基于输出系数模型的北京地区农业面源污染负荷估算[J]. 农业工程学报,2011,27(7):7-12.〔LIU Yaqiong,YANG Yulin,LI Fahu. Estimation of pollution loads from agricultural nonpoint sources in Beijing region based on export coefficient modeling approach [J]. Transactions of the CSAE,2011,27(7):7-12.〕

[10] 孙秀秀,包丽颖,郁亚娟等. 哈尔滨地区农业面源污染负荷估算与分析[J]. 安全与环境学报,2015,15(5):300-305.〔SUN Xiuxiu,BAO Liying,YU Yajuan. Estimation and analysis of the pollution loads from the agricultural non-point source in Harbin region [J]. Journal of Safety and Environment,2015,15(5):300-305.〕

[11] 肖新成. 重庆三峡库区农业面源污染防治研究—基于农户参与、政府主导的视角[D]. 重庆:西南大学,2015.〔XIAO Xincheng. Study of agricultural non-point source pollution control in Chongqing of Three Gorges Reservoir Region:Based on farmer participation and government leading perspective[D]. Chongqing:Southwest University,2015.〕

[12] 王雪蕾,王新新,朱利,等. 巢湖流域氮磷面源污染与水华空间分布遥感解析[J]. 中国环境科学,2015,35(5):1511-1519.〔WANG Xuelei,WANG Xinxin,ZHU li. Spatial analysis on diffuse pollution and algal bloom characteristic with remote sensing in Chao Lake Basin[J]. China Environmental Science,2015,35(5):1511-1519.〕

[13] 刘新平,韩桐魁. 新疆绿洲生态环境问题分析[J]. 干旱区资源与环境,2005,19(1):23-29.〔LIU Xinping,HAN Tongku. A-

nalysis on the causes of environmental issues of oasis ecology in Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005,19(1):23-29.]

[14] 肖新成,倪九派,何丙辉,等.三峡库区重庆段农业面源污染负荷的区域分异与预测[J].应用基础与工程科学学报,2014,(4):634-646.[XIAO Xincheng, NI Jiupai, HE Binghui, et al. Estimation of agricultural nonpoint source pollution load sand its regional differentiation in chongqing section of the Three Gorges Reservoir Region[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014,(4):634-646.]

[15] 胡静锋.重庆市农业面源污染测算与空间特征解析[J].中国农业资源与区划,2017,38(1):135-144.[HU Jingfeng. Measurement and spatial feature analysis of agricultural non-point source pollution in Chongqing [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2017,38(1):135-144.]

[16] 李智飞,门宝辉,张士锋,等.河西走廊地区狭义/广义水资源脆弱性对比研究[J].干旱区地理,2014,37(5):939-947.[LI Zhifei, MEN Baohui, ZHANG Shifeng, et al. A comparative study of narrow/general water resources vulnerability in Hexi Corridor region[J]. Arid Land Geography,2014,37(5):939-947.]

[17] 虞燕娜,朱江,吴绍华,等.多风险源驱动下的土地生态风险评价——以江苏省射阳县为例[J].自然资源学报,2016,31(8):1264-1274.[YU Yanna, ZHU Jiang, WU Shaohua, et al. Assessment of land ecological risks driven by multi-sources: A case study of Sheyang County, Jiangsu Province[J]. Journal of Natural Resources,2016,31(8):1264-1274.]

[18] 孟优,周益民,侯秀玲,等.干旱区绿洲生态安全评价研究——以新疆生产建设兵团为例[J].干旱区地理,2014,37(1):163-169.[MENG You, ZHOU Yimin, HOU Xiuling, et al. Assessment of the eco-security in arid areas oasis: A case of Xinjiang Production and Construction Corps[J]. Arid Land Geography, 2014,37(1):163-169.]

[19] 徐浩田,周林飞,成遣.基于PSR模型的凌河口湿地生态系统健康评价与预警研究[J].生态学报,2017,37(24):8264-8274.[XU Haotian, ZHOU Linfei, CHENG Qin. Study on ecosystem health evaluation and risk assessment for Linghekou wetlands based on a PSR model[J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(24):8264-8274.]

[20] 吕晓,刘新平,李振波.塔里木河流域生态经济系统耦合态势分析[J].中国沙漠,2010,30(3):620-624.[LYU Xiao, LIU Xinping, LI Zhenbo. Coupling Situation of eco-economic system in Tarim River Basin[J]. Journal of Desert Research,2010,30(3):620-624.]

[21] 肖新成,何丙辉,倪九派,等.农业面源污染视角下的三峡库区重庆段水资源的安全性评价——基于DPSIR框架的分析[J].环境科学学报,2013,33(8):2324-2331.[XIAO Xincheng, HE Binghui, NI Jiupai, et al. Safety assessment of water resources in Chongqing section of the Three Gorges Reservoir Area based on DPSIR model from the perspective of agricultural non-point pollution source[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(8):2324-2331.]

[22] 吴文婕,石培基,魏伟,等.石羊河流域绿洲城市水土资源利用生态风险评价——以武威市为例[J].干旱区地理,2012,35(5):838-846.[WU Wenjie, SHI Peiji, WEI Wei, et al. Evaluation on soil and water ecological risk of oasis city in Shiyang River Basin: A case of Wuwei City[J]. Arid Land Geography,2012,35(5):838-846.]

[23] 孙心亮,方创琳.干旱区城市化过程中的生态风险评价模型及应用——以河西地区城市化过程为例[J].干旱区地理,2006,29(5):668-674.[SUN Xinliang, FANG Chuanglin. Model and application of ecological risk appraisal in the course of urbanization in arid area[J]. Arid Land Geography,2006,29(5):668-674.]

[24] 黄祖鑫.我国耕地污染防治法律制度研究[D].武汉:华中农业大学,2017.[HUANG Zuxin. Research on legal system of soil contamination of cultivated land prevention and control in China[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2017.]

Ecological risk assessment of cultivated non-point source pollution in Hetan Prefecture, Xinjiang

TIAN Feng-shou, LIU Xin-ping, YUAN Wei-peng

(*School of Management, Xinjiang Agricultural University, Xinjiang, Urumqi* 830052, *Xinjiang, China*)

Abstract: With the excessive chemical fertilizers and agricultural film put into the agricultural production, the non-point source pollution in the cultivated land has been aggravated. In this paper, the Hetan Prefecture in the lower reaches of the Tarim River Basin, Xinjiang, China is selected as the research area. Based on the PSR framework and the "input-output" principle of economics, the physicochemical data of cultivated land is added as a status indicator to construct an ecological risk assessment index system for the non-point source pollution. The spatial and temporal differentiation of the ecological risk level of cultivated land non-point source pollution in Hetan Prefecture in 1980 and 2016 is analyzed using the Arcgis software. The following conclusions are drawn from this study: The ecological risk level of the non-point source pollution in Hetan Prefecture in 2016 has been increased significantly compared with that in 1980. Particularly, the ecological risk level of the cultivated land in Moyu County and Yutian County has reached the highest V level, while Minfeng County is vulnerable due to its own ecological environment. The three counties can be used as pilots to promote non-point source pollution control. The research results can be taken as a reference for exploring the construction of non-point source pollution ecological risk assessment system, and guiding the development of differentiated non-point source pollution control according to regional characteristics.

Key words: Ecological risk assessment; Spatial and temporal differentiation; PSR framework; surface land source pollution; Hetan Prefecture